Diseño de cárcamos de bombeo rectangulares

Teresa de Jesús Soriano Pérez
Francisco Javier Aparicio Mijares

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

En este artículo se presenta una investigación sistemática referente al comportamiento hidráulico de los cárcamos de bombeo rectangulares, se describen los resultados obtenidos de una serie de pruebas experimentales, se proporcionan recomendaciones de diseño para dichos cárcamos y se indican las posibles consecuencias de no cumplirlas. Estas recomendaciones toman en cuenta el número de Froude, que es un factor fundamental en el comportamiento hidráulico de los cárcamos. Además, se describen los resultados experimentales obtenidos de algunas pruebas de inhibición de vórtices, utilizando rejillas verticales y objetos flotantes como dispositivos inhibidores.

Uno de los problemas más comunes en el funcionamiento hidráulico de cárcamos de bombeo es la formación de vórtices, pues éstos causan diversos tipos de daños o problemas en el funcionamiento del equipo de bombeo y en las líneas de tuberías asociadas. Los daños más comunes son los siguientes (Gulliver, *et al.*, 1987):

- Los vórtices superficiales pueden llevar aire de la superficie libre hacia la bomba, haciendo que el impulsor trabaje en forma diferente a la que fue diseñado, lo que en consecuencia produce una reducción del gasto en la bomba.
- Los vórtices pueden causar ruidos considerables, así como vibraciones en las tuberías, aumento en el desgaste de las partes móviles y mal funcionamiento de la bomba, al grado de que incluso puede inutilizarse la instalación.
- La prerrotación del flujo que entra a la bomba cambia el ángulo de ataque con respecto al de diseño del impulsor, y puede afectar la eficiencia de las bombas y causar cavitación. Cuando el agua contiene 1% de aire se puede reducir la eficiencia de una bomba centrífuga hasta en un 15%.

Un cárcamo de bombeo puede tener el tubo de succión vertical hacia arriba, hacia abajo u horizontal, dependiendo del tipo de bomba (Knauss, 1987). Los cárcamos con el tubo de succión vertical hacia arriba se asocian con bombas de flujo axial, muy comunes en nuestro medio. En la mayoría de los casos, estas bombas tienen el impulsor sumergido, por ser el caso más simple y económico, aun cuando para el mantenimiento o reparación del impulsor pudiera requerirse el vaciado total del cárcamo o la remoción de la bomba. Un cárcamo de bombeo puede ser simple (unitario) o múltiple, dependiendo de si contiene una o más bombas.

Debido al gran número de variables que intervienen en este fenómeno, un tratamiento analítico del problema resultaría muy complicado, por lo que suelen hacerse estudios en modelos hidráulicos *ad hoc* para verificar y eventualmente corregir el diseño de un cárcamo de bombeo para que funcione de manera aceptable.

Este estudio se refiere fundamentalmente a los cárcamos rectangulares con tubo de succión vertical hacia arriba, que son los más comunes en nuestro país, aunque muchas de las conclusiones se pueden aplicar también a otros casos. Además, para aislar las características básicas del flujo en este tipo de instalaciones, este trabajo se referirá a cárcamos unitarios, esto es, con un solo equipo de bombeo.

Parámetros importantes en el diseño de un cárcamo de bombeo

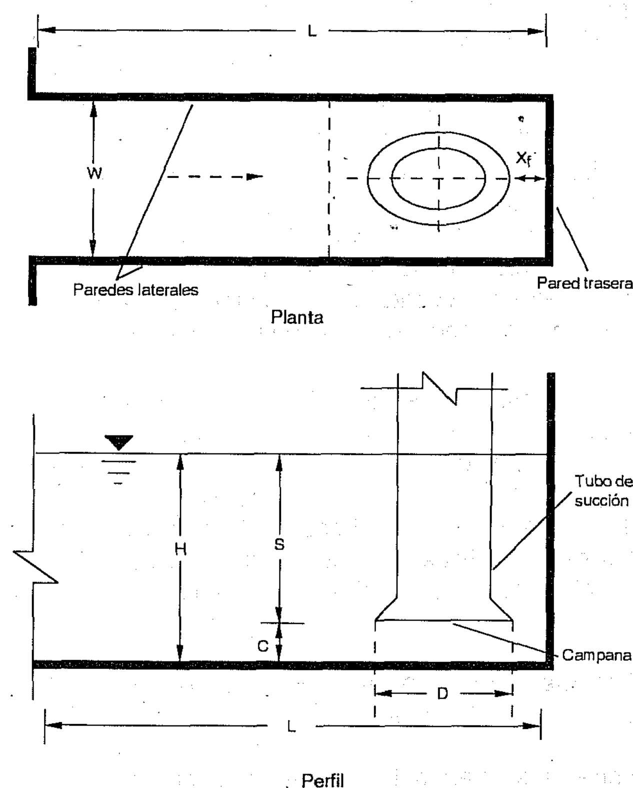
Entre los parámetros que pueden afectar el funcionamiento de la bomba debido a su influencia

sobre los vórtices superficiales y sumergidos en un cárcamo se encuentran los siguientes (véase ilustración 1).

Canal de aproximación

La geometría y la orientación de este canal con respecto al compartimiento de la bomba y la velocidad del flujo en el mismo afectan la circulación dentro del cárcamo y, por lo tanto, contribuyen a la vorticidad. Las expansiones de las paredes laterales o los cambios de pendiente en el piso del canal de aproximación cerca del compartimiento de la bomba generalmente causan separación del flujo y formación de remolinos, lo que contribuye a la formación de vórtices (Knauss, 1987). Por otro lado, los canales de aproximación curvados cerca de la entrada del compartimiento de la bomba son indeseables debido a su influencia en la generación de flujo no uniforme dentro del compartimiento (*ibid*). Obstrucciones tales como los soportes de rejillas o compuertas localizadas a la entrada del cárcamo también pueden contribuir a la separación del flujo y crear remolinos. La circulación y los vórtices pueden también deberse a variaciones de la velocidad en diferentes zonas del cárcamo o incluso en diferentes puntos en una misma sección transversal.

1. Parámetros importantes en un cárcamo de bombeo



Sumergencia de la campana del tubo de succión (S)

Esta no debe ser menor que un valor crítico bajo el cual pueden ocurrir vórtices superficiales. La sumergencia crítica depende del tipo de aproximación del flujo y de otras fuentes de vorticidad existentes en el cárcamo (*ibid*).

Distancia del piso a la campana del tubo de succión (C)

Entre mayor sea esta distancia, menor será la sumergencia para un nivel dado del agua. Debido a esto, es importante no dar una distancia del piso a la campana del tubo de succión mayor que la necesaria. Para distancias muy pequeñas se puede intensificar la formación de vórtices sumergidos. Comúnmente se recomiendan valores entre 0.4 y 0.75 del diámetro de la campana de succión (Prosser, 1977; Paterson y Noble, 1982; Chang, 1977).

*Ancho del cárcamo (**W**) y distancia del labio de la campana a la pared trasera (**Xf**)*

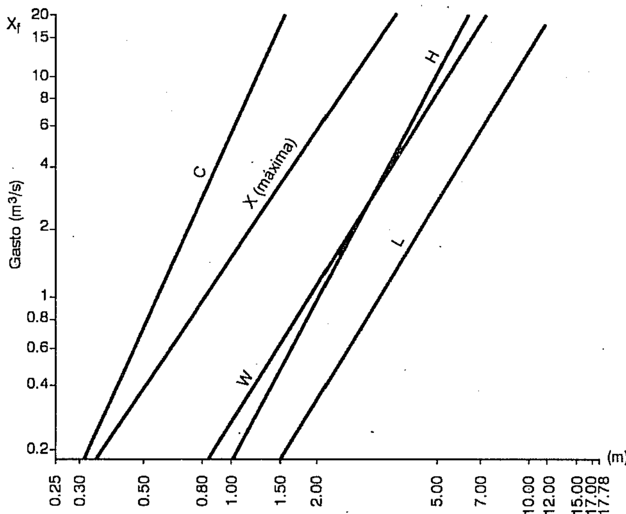
El ancho del cárcamo de bombeo determina la velocidad de aproximación; además, éste y la distancia de la pared trasera al tubo de succión pueden afectar la frecuencia e intensidad de algunos vórtices. Si la distancia de la pared trasera es muy pequeña se pueden originar vórtices sumergidos. El eje de tubo de succión se localiza usualmente a la mitad del ancho del cárcamo de bombeo. En general, se recomienda usar anchos no menores a 2D (donde D = diámetro de la campana) y distancias del labio de la campana a la pared trasera no menores a 0.25D (Prosser, 1977; Paterson y Noble, 1982; Chang, 1977).

Las normas usuales para el diseño de cárcamos de bombeo son las de la Asociación Británica de Investigación Hidromecánica (BHRA) (Prosser, 1977), y la del Instituto Hidráulico (HI) (Hydraulic Institute, 1975), mostrados respectivamente en el cuadro 1 y en la ilustración 2. La aplicación de estas guías no garantiza inhibir la formación de vórtices, pero es

1. Guías de diseño de la Asociación Británica de Investigación Hidromecánica

W/D	C/D	L/D	Xf/D	Vm(m/s)	Ve(m/s)	H/D
2-3	0.5	> 4	0.25	0.33	1.2	> 2

2. Guías de diseño del Instituto Hidráulico



útil como una base para probar diseños iniciales en modelos físicos (Sweeney *et al.*, 1982).

En el cuadro 1, Vm es la velocidad media dentro del cárcamo y Ve es la de entrada al mismo. Las demás variables se definen en la ilustración 1.

Sin embargo, como se observa, estas guías de diseño son sumamente rígidas, pues no proponen rangos de las variables ni indican las posibles consecuencias de que un diseño dado se salga de ellas. En principio, parece razonable suponer que el valor de W/D se relaciona con vórtices de pared lateral, el de C/D con los de piso, el de Xf/D con los de pared trasera y los de L/D, Vm/D y Ve/D con la vorticidad superficial. En todo caso, parece difícil en general tener la suficiente flexibilidad en el diseño como para cumplir con estas guías completamente.

Vorticidad en cárcamos de bombeo rectangulares construidos

Para evaluar la utilidad y las limitaciones de las normas de diseño usuales en la actualidad, en este estudio se analizó una muestra de 15 cárcamos de bombeo rectangulares construidos en México y en el extranjero que presentaron problemas de formación de vórtices (ver también Soriano y Aparicio, 1990). En el cuadro 2 se muestran las características de cada proyecto y en el cuadro 3 se indica el problema que presentaron, así como la solución adoptada. Se analizaron los 15 casos comparando las dimensiones de los cárcamos con los que daban las guías de diseño del Instituto Hidráulico y la BHRA. De esta comparación se hicieron las siguientes observaciones:

- En los casos 2, 4, 8 y 15 se violan ambas normas en el valor de Xf/D y en los casos 5, 10 y 13 se violan las de la BHRA; sin embargo, en ninguno de ellos se reportan vórtices de pared trasera significativos.
- En los casos 7 y 9 no se viola ninguna norma en el valor de Xf/D y sí se presentaron vórtices de pared trasera.
- En el caso 1 se viola la norma del HI en el valor de W/D y en los casos 11 y 12 se viola la de la BHRA. En ninguno se reportaron vórtices de pared lateral.
- En los casos 6, 7 y 8 no se viola ninguna norma en W/D pero se tuvieron problemas de vorticidad de pared lateral.
- Los casos 4 y 5 violan el valor de C/D dado por ambas normas, mientras que el caso 15 viola el de la BHRA, pero en ninguno se reportó vorticidad de piso.
- En los casos 1, 6, 8, 10 y 14 los valores de C/D se encontraron dentro de los dados por ambas normas, pero se encontraron vórtices de piso.
- Todos los cárcamos, con excepción de los casos 6 y 15, reportaron vorticidad superficial. Sin embargo, sólo el caso 10 cae fuera de las normas respecto al valor de L/D.

En ningún caso –salvo el 3, que es, por otra parte, con el que menos datos se cuenta– se tiene una correlación entre las normas y el comportamiento observado de los cárcamos.

Por otra parte, se observó que en varios casos las normas de ambas instituciones dictaban valores notablemente diferentes al aplicarse a un cárcamo dado. Por mencionar algunos, en el de San Luis

2. Características de los cárcamos de bombeo estudiados

Proyecto	Gasto (m^3/s) (j)	Diám. (m) (j)	$X_{f/D}$	W/D	C/D	L/D	H/D	Fr	V (m/s)
1 Mazatlán II (MEX) (a)	3.03	1.83	0.55	2.74	0.51	13.26	1.10	0.07	0.30 (l)
2 Manzanillo (MEX) (b)	6.43	2.24	0.62	2.27	0.67	(m)	2.97	0.02	0.19 (l)
3 Río Escondido (MEX) (c)	6.70	1.94	0.25	2.32	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
4 Lerdo (MEX) (d)	1.04	1.04	0.48	1.92	0.72	(m)	1.35	0.10	0.37 (l)
5 San Luis Potosí (MEX) (e)	4.18	1.30	0.55	2.35	0.34	(m)	1.88	0.11	0.56 (l)
6 Río Belle (EUA) (f)	8.38	2.29	0.57	2.67	0.50	2.10	2.85 (k)	0.03	0.21 (k)
7 Hope Creel (EUA) (f)	12.18	2.26	0.11	2.36	0.43	8.90	2.73 (k)	0.05	0.37 (k)
8 Malaysia (EUA) (f)	4.77	2.10	0.45	2.03	0.52	5.52	2.22 (k)	0.04	0.24 (k)
9 Limerick (EUA) (f)	0.57	0.76	0.27	2.80	0.40	5.60	2.80 (k)	0.03	0.13 (k)
10 Palo Verde (EUA) (f)	10.50	2.49	0.33	2.13	0.48	2.30	2.84 (k)	0.03	0.28 (k)
11 Pilgrim (EUA) (f)	12.89	2.95	0.55	3.17	0.41	4.76	2.92 (k)	0.02	0.16 (k)
Riegos de Levante, (España)									
12 Est. bombeo no. 2 (g)	6.00	1.13	(m)	5.00	0.75	> 9.6	(m)	(m)	(m)
13 Est. bombeo no. 3 (g)	6.00	1.20	0.50	3.34	0.61	6.70	(m)	(m)	(m)
14 Est. generadora Trimble County (EUA) (h)	5.46	2.23	0.57	2.00	0.50	5.02	(m)	(m)	(m)
15 Lago de Chicot (EUA) (i)	17.13	3.66	0.75	1.92	0.42	7.17	1.48 (k)	0.06	0.45 (k)

(a) Ojeda *et al.*, 1988
(b) Bonilla *et al.*, 1979
(c) Bonilla *et al.*, 1980
(d) González *et al.*, 1989
(e) Moreno *et al.*, 1985
(f) Sweeney *et al.*, 1985
(g) Ramos *et al.*, 1985
(h) Odgaard y Dlubac, 1984
(i) Nakato *et al.*, 1978
(j) Gastos y diámetros en prototipo
(k) Tirante medio, velocidad media
(l) Tirante mínimo, velocidad máxima
(m) Sin datos

3. Problemas presentados y soluciones utilizadas

Proyecto	Vorticidad superficial	Vorticidad sumergida	Prerrotación	Dispositivos antivórtices utilizados
1 Mazatlán II (MEX)	Sí	Piso	No	Partidor de piso y pared trasera, mampara, escalón, rejillas flotantes
2 Manzanillo (MEX)	Sí	Piso	No	*
3 Río Escondido (MEX)	Sí	Piso	No	*
4 Lerdo (MEX)	Sí	No	Sí	Objeto flotante y mampara
5 San Luis Potosí (MEX)	Sí	No	No	*
6 Río Belle (EUA)	No	Piso y pared trasera, lateral	No	Partidores de pared y piso, chaflanes de pared lateral/piso
7 Hope Creek (EUA)	Sí	Piso y pared trasera, lateral	Sí	Partidores de pared y piso, chaflanes de pared lateral/piso, viga superficial
8 Malaysia LNG (EUA)	Sí	Piso y pared lateral	Sí	Partidores de pared y piso, chaflanes de pared trasera y piso/pared
9 Limerick (EUA)	Sí	Piso y pared trasera, lateral	Sí	Partidor de pared, chaflanes pared lateral y trasera, vertedor, viga sup. y rejilla
10 Palo Verde (EUA)	Sí	Piso	Sí	Pilas guía, partidor piso y cono
11 Pilgrim (EUA)	Sí	Piso y pared trasera	Sí	Pilas guía, viga superficial, partidor piso y pared trasera
Riegos de Levante (España)				
12 Est. bombeo no. 2	Sí	Piso	No	Aletas, pilas, cono partidor de piso, viga superficial, paredes guía
13 Est. bombeo no. 3	Sí	Piso	No	
14 Est. Generadora Trimble County (EUA)	Sí	Piso y pared trasera	Sí	Aletas, partidores piso y pared trasera, chaflanes, pared lateral y trasera
15 Lago de Chicot (EUA)	No	Pared	Sí	Partidor pared, rejillas y aletas

*Los proyectos fueron estudiados con objeto de mejorar el funcionamiento hidráulico de los cárcamos en proyecto; no se utilizaron dispositivos antivórtices

Potosí, el HI especifica un valor máximo de Xf/D de 0.25; en la estación de bombeo núm. 2 de Riegos de Levante el HI indica un valor de W/D de 3.87 mientras que la BHRA lo limita a un rango de entre 2 y 3; y en este mismo caso, el HI dice que C/D debe ser de 0.94 en tanto que la BHRA especifica 0.5. Además, se observó que de las 25 violaciones encontradas, el 64% fueron a ambas normas, el 28% sólo a las de la BHRA y únicamente el 8% al HI aislado. Esto indica que, en general, al violar una norma se viola también la otra y que las de la BHRA son más restrictivas que las del HI.

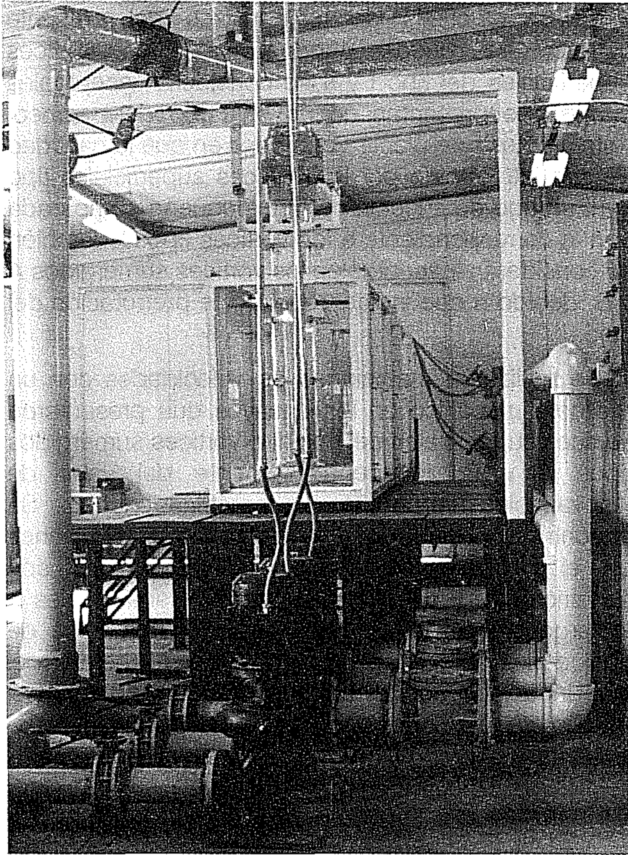
Ambas normas son poco flexibles y no reflejan las posibles consecuencias de que un diseño se salga de ellas. Además, en los 15 cárcamos de bombeo analizados en este estudio se observó una correlación muy pobre entre las normas y el comportamiento hidráulico esperado, por lo cual es necesario contar con normas de diseño más confiables para cárcamos de bombeo rectangulares. Con base en esto, se llevó a cabo una investigación sistemática sobre el comportamiento hidráulico de los cárcamos de bombeo que se presenta a continuación.

Instalación experimental

El flujo en un cárcamo de bombeo es muy complejo y una modelación matemática del mismo estaría fuera de los alcances actuales de este trabajo. Además, un estudio experimental es conveniente para adquirir experiencia sobre el tema y generar datos útiles para la calibración de futuros modelos matemáticos.

Por ello, se decidió abordar el problema empíricamente, mediante observaciones en una instalación experimental de laboratorio. El diseño del cárcamo de bombeo experimental tuvo como base los valores reportados de los parámetros adimensionales S/D, L/D, W/D, C/D y el número de Froude Fr ($Fr = Vm/(g * H)^{1/2}$, donde Vm = velocidad media, g = aceleración gravitatoria y H = tirante) de los cárcamos construidos con problemas de formación de vórtices descritos anteriormente, y los valores que sugieren las normas de diseño de la BHRA y el HI, de forma que se pudieran realizar pruebas que cubrieran esos rangos de las variables adimensionales cuando menos, tomando en cuenta a la vez las disponibilidades de espacio en el laboratorio provisional de hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Las pruebas experimentales se realizaron en un cárcamo de bombeo rectangular unitario (véanse ilustraciones 3 y 4) donde el sistema de bombeo se simula por medio de un sifón de PVC de 8" de diámetro, que alimenta a tres bombas centrífugas verticales, cada una con un gasto de 26.7 l/s y una potencia de 3 HP, colocadas en paralelo. El ancho del cárcamo es de 0.60 m y tiene una longitud máxima de 3.9 m. El sistema es de ciclo cerrado, es decir, se recircula el agua, lo que facilita el manejo



3. *Instalación experimental del cárcamo de bombeo rectangular*

del nivel de superficie libre. El aforo en la instalación se hace por medio de tres orificios de 0.076 m de diámetro cada uno, colocados en tuberías de 4" de diámetro y diseñados según la norma ISO 5167 de la Organización Internacional de Estandarización (1980). Cada orificio está conectado a un manómetro de mercurio. El gasto se regula por medio de válvulas de compuerta de 4" de diámetro.

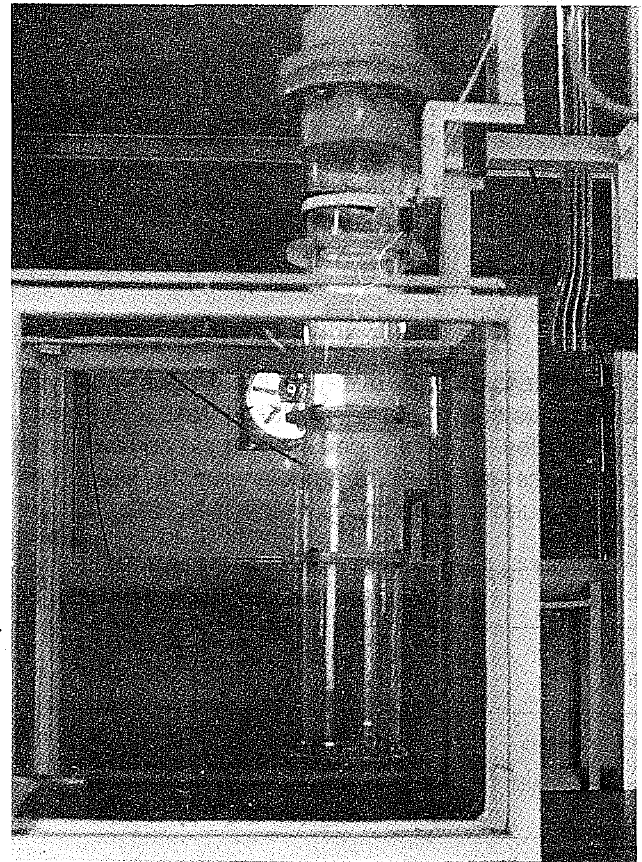
La parte inicial del sifón es móvil y se le puede añadir cualquier tubo de succión de la longitud y forma deseadas. La longitud del cárcamo puede variarse mediante la colocación de una rejilla vertical en diferentes posiciones. Como se observa, esta instalación experimental presenta grandes ventajas en su manejo operativo, en su tamaño y en cuanto a la facilidad para realizar modificaciones.

Programa experimental

De acuerdo con la literatura consultada (Anwar, 1968; Berge, 1966; HI, 1975; Prosser, 1977; Sweeney *et al.*, 1982), y tras un análisis dimensional de las cantidades físicas involucradas en el fenómeno, para llevar a cabo los experimentos se seleccionaron las siguientes variables geométricas: el diámetro de la campana o tubo de succión D, la distancia del piso a la campana o tubo de succión C, la distancia de la pared trasera al labio de la campana Xf, la distancia de las paredes laterales al labio de la campana X, la longitud del cárcamo L y la sumergencia S. Adicionalmente, se propuso la hipótesis de que el comportamiento hidráulico de la instalación debería estar controlado por el número de Froude:

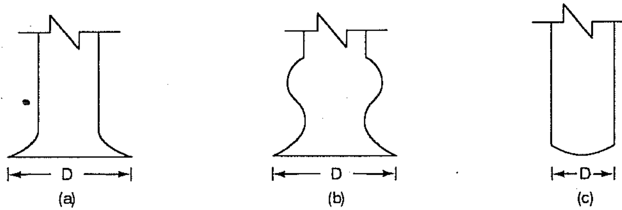
$$F_r = \frac{V_m}{\sqrt{gH}}$$

Por otro lado, para evaluar la influencia de la forma de la campana de succión en el comportamiento hidráulico de la instalación, se probaron dos tipos: una con tubo recto y otra con abocinamiento para alojar el impulsor (véase ilustración 5). Se usó también un tubo recto de $D = 20.3$ cm sin campana (véase ilustración 5). En el cuadro 4 se muestran los valores utilizados de las variables, incluyendo el gasto Q y el tirante H. La longitud L del cárcamo se varió colocando una rejilla paralelizadora del flujo a diferentes distancias del tubo de succión.



4. *Cámara de succión del cárcamo de bombeo rectangular*

5. Tipos de tubo de succión: a) recto, b) con abocinamiento usual para alojar el impulsor y c) tubo recto sin campana



Se realizó un total de 576 ensayos. Las variables geométricas se adimensionalizaron dividiendo sus valores entre el diámetro de la campana de succión.

Por lo que se refiere a la clasificación de los vórtices observados en la instalación experimental, se encontró que la mostrada en la ilustración 6, basada en la de Dicmas (1978) y Sweeney, Elder y Hay (1982), es suficientemente satisfactoria para evaluar los riesgos de cada tipo de vórtice en los prototipos. La intensidad se mide, de manera subjetiva, observando qué tan definido es el vórtice y cuánto aire arrastra al interior del tubo de succión, y la intermitencia indica los lapsos en que aparecen y desaparecen los vórtices. Los vórtices superficiales se clasifican según sus tipos en:

I. Pequeños hoyuelos
II. Remolino con cono difuso
III. Vórtice con corazón abierto aireado

Por su parte, los vórtices sumergidos son:

Tipo A. Vórtice de piso
Tipo B. Vórtice de pared

La intensidad se mide en los grados 1, 2 y 3, cuando es suave, mediana y fuerte, respectivamente. Los grados 1, 2, 3 y 4 de intermitencia corresponden a vórtices esporádicos, medianamente frecuentes, muy frecuentes o perennes, respectivamente.

4. Valores de las variables utilizadas en los ensayos

Tipo de tubo	D (m)	C (m)	X_f	X	L	Q (m^3/s)	H (m)
Con campana (con y sin abocinamiento)	0.25 0.30	0.10 0.15 0.19	0.082 0.11	0.15 0.18	3.7 3 2.30 1.60	0.03 0.04 0.05 0.07	0.30 0.40 0.60 0.80
Recto	0.30	0.15	0.13	0.20			

Como hipótesis de los autores del presente trabajo, se puede suponer que los vórtices superficiales del tipo I y II se consideran aceptables cuando se presentan en un cárcamo de bombeo. Esta hipótesis se plantea con base en que la cantidad de aire introducido por los vórtices superficiales tipo I y II al tubo de succión es muy pequeña comparada con la correspondiente a los vórtices tipo III. También se consideran inaceptables los vórtices sumergidos A y B, debido a que indican que existe prerrotación del flujo.

Se realizaron mediciones de velocidades con un molinete mecánico en los ensayos que presentaron vórtices superficiales del tipo III o vórtices sumergidos tipos A y B, independientemente del valor de las variables hidráulicas y geométricas dadas. Se encontró que, en todos los casos, las distribuciones en el sentido vertical de las velocidades son simétricas para diferentes secciones transversales a lo largo del cárcamo, por lo cual la formación de vórtices no parece estar causada por asimetrías del flujo inducidas por las condiciones de descarga del equipo de bombeo o errores constructivos de la instalación experimental.

Resultados

En las ilustraciones 7, 8, 9 y 10 se graficaron las relaciones S/D, L/D, W/D y X_f/D contra el número de Froude (Fr), tanto para los ensayos de laboratorio realizados en este trabajo como para los cárcamos de bombeo reportados en la literatura, utilizando la clasificación arriba descrita. De estas mismas ilustraciones se pueden hacer las siguientes observaciones respecto a las variables adimensionales.

Sumergencia adimensional, S/D (rango experimental: 0.4 – 3.2)

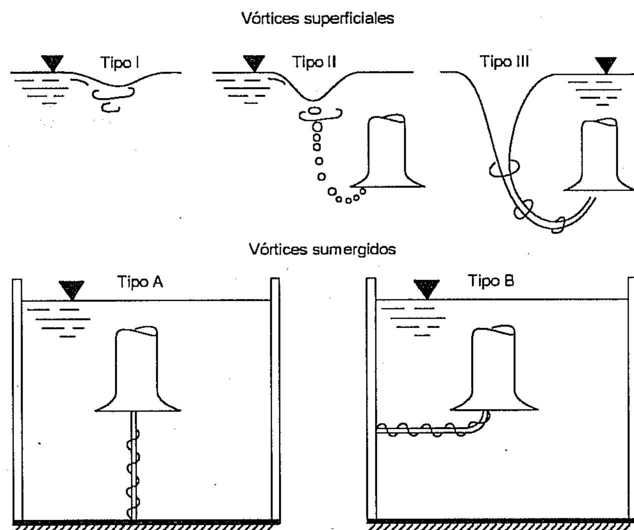
Vórtices superficiales

En la gráfica de S/D contra Fr (véase ilustración 7a) se observa que la zona de mayor riesgo debido a la formación de vórtices del tipo III es la correspondiente a valores de $Fr \geq 0.05$, independientemente del valor de S/D. Para $Fr < 0.05$ y con valores de $S/D > 1.5$ sólo se presentaron vórtices de los tipos I y II.

Vórtices sumergidos

Para valores de $Fr > 0.06$, independientemente del valor de la relación S/D, se formaron vórtices sumergidos tanto de pared como de piso. Por el

6. Clasificación de los vórtices utilizada en los ensayos



contrario, para $Fr < 0.06$ no se observaron vórtices de ningún tipo (véase ilustración 7b).

Longitud adimensional, L/D (rango experimental: 2 – 18.2)

Vórtices superficiales

La zona de mayor riesgo en este caso, donde se forman vórtices del tipo III, corresponde a valores de $Fr > 0.055$ independientemente del valor de L/D. La zona de mayor seguridad, con vórtices tipos I y II está donde se cumple con las relaciones $L/D > 6$ y $Fr < 0.055$ (véase ilustración 8a).

Vórtices sumergidos

No se observa formación de vórtices con valores $L/D > 6$ y $Fr < 0.06$. La zona con formación de vórtices de piso y pared es para $Fr > 0.06$, independientemente del valor de L/D (véase ilustración 8b).

Distancia succión–fondo adimensional, C/D (rango experimental: 0.29 – 0.85)

Vórtices superficiales

La región en que $C/D > 0.52$ y $Fr < 0.055$ será la más confiable, puesto que sólo se tiene formación de vórtices tipos I y II. Cuando $Fr > 0.055$, se formaron vórtices del tipo III sin importar el valor de C/D.

Vórtices sumergidos

Se presentaron vórtices de pared y piso para $Fr \geq 0.05$ en cualquier relación de C/D. No se formaron vórtices para $C/D > 0.52$ y $Fr < 0.05$.

Ancho adimensional, W/D (rango experimental: 1.98 – 3.16)

Vórtices superficiales

La región más desfavorable, por presentar vórtices del tipo III, es para $Fr \geq 0.055$ y $2.8 \geq W/D \geq 1.95$ (éste fue el rango de variación de W/D ensayado, por lo cual se desconoce el comportamiento del flujo para otros valores). La región más confiable, con formación de vórtices tipos I y II, se da con $Fr < 0.055$ (véase ilustración 9a).

Vórtices sumergidos

No se formaron vórtices de piso y pared para $Fr < 0.05$; por el contrario, se presentaron vórtices en ambos casos para $2.8 \geq W/D \geq 1.95$ (véase ilustración 9b).

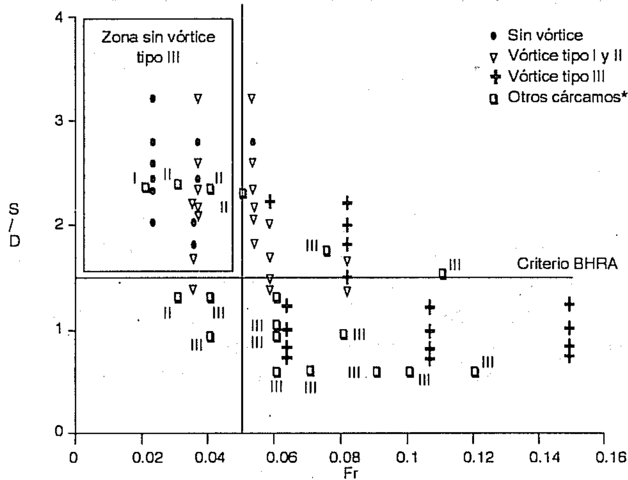
Inhibición de vórtices

Cuando se descubren vórtices en instalaciones existentes o bien cuando por razones topográficas, económicas o de espacio no es posible cumplir con las recomendaciones anteriores, los remedios que se pueden seguir, en general, están limitados a modificaciones menores. Puede ser impráctico alterar el tamaño o profundidad de la toma o modificar las fronteras del cárcamo de bombeo que afectan el flujo de llegada. Por tanto, estas modificaciones consisten casi siempre en la colocación de dispositivos eliminadores o inhibidores de vórtices.

Para esta parte del presente estudio, se realizaron ensayos en la instalación experimental del cárcamo de bombeo rectangular a fin de probar la utilidad de las rejillas verticales y objetos flotantes como dispositivos inhibidores de vórtices.

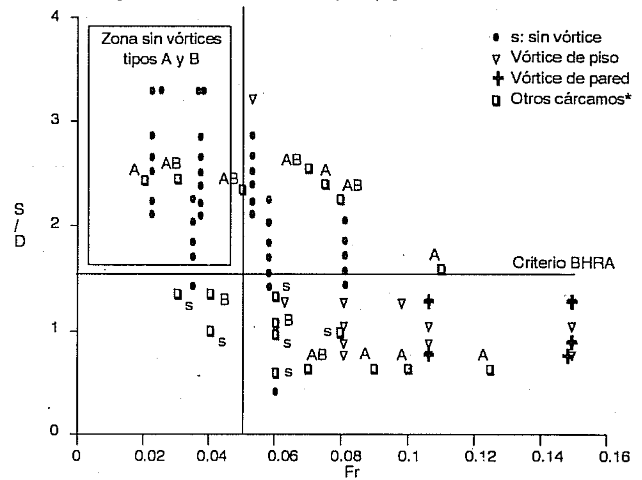
Con base en las recomendaciones que reportan diversos autores en la literatura (Denny y Young, 1957; Anwar, 1968; Berge, 1966; Haindl, 1959; Stepanoff, 1948), se eligieron diferentes dispositivos antivorticosos: objetos flotantes como los mostrados en la ilustración 11 y rejillas verticales que se representan en la ilustración 12. Con diversas combinaciones de estos dispositivos se llevó a cabo una serie de ensayos para observar su eficiencia en la inhibición de vórtices. Los objetos flotantes se construyeron con tablas de unicel y se usaron dos tipos de rejillas: la tipo A de alambre y la tipo B de

7a. Ocurrencia de vórtices superficiales, en función de la sumergencia adimensional (S/D) y Fr



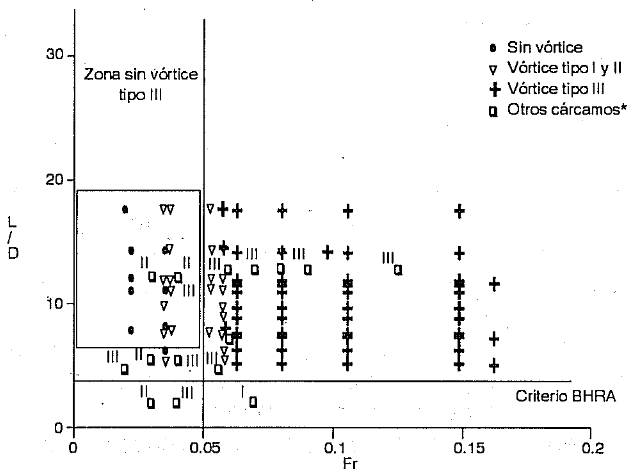
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (I, II, III)

7b. Ocurrencia de vórtices sumergidos, en función de la sumergencia adimensional (S/D) y Fr



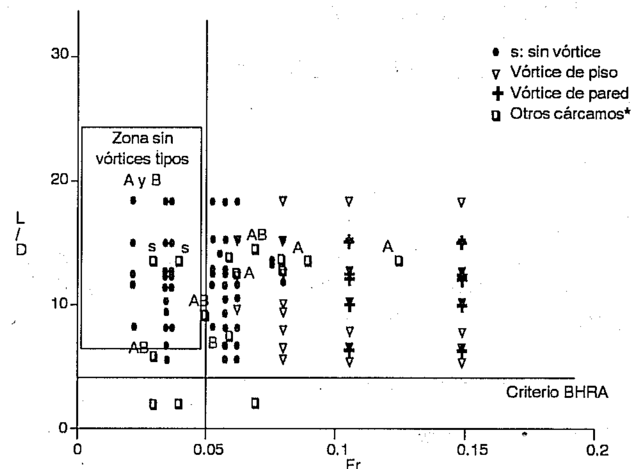
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (A, B)

8a. Ocurrencia de vórtices superficiales, en función de la longitud adimensional (L/D) y Fr



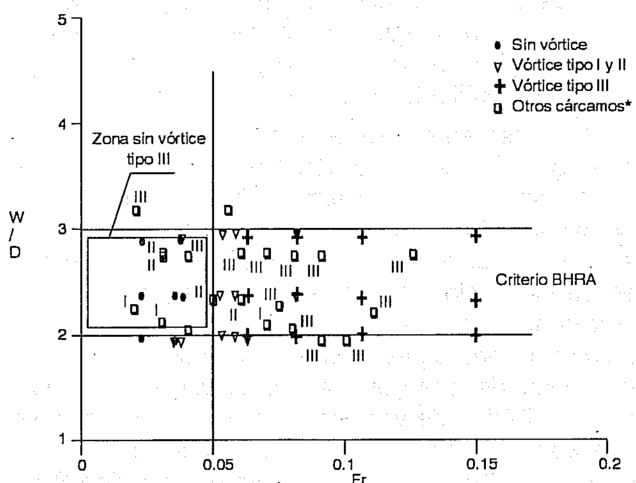
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (I, II, III)

8b. Ocurrencia de vórtices sumergidos, en función de la longitud adimensional (L/D) y Fr



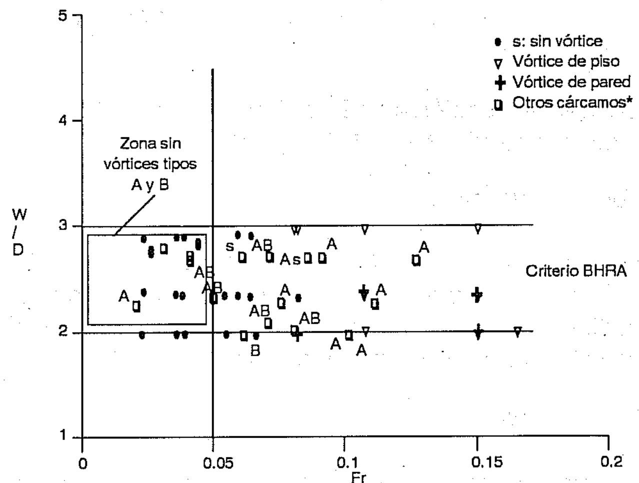
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (A, B)

9a. Ocurrencia de vórtices superficiales, en función del ancho adimensional (W/D) y Fr



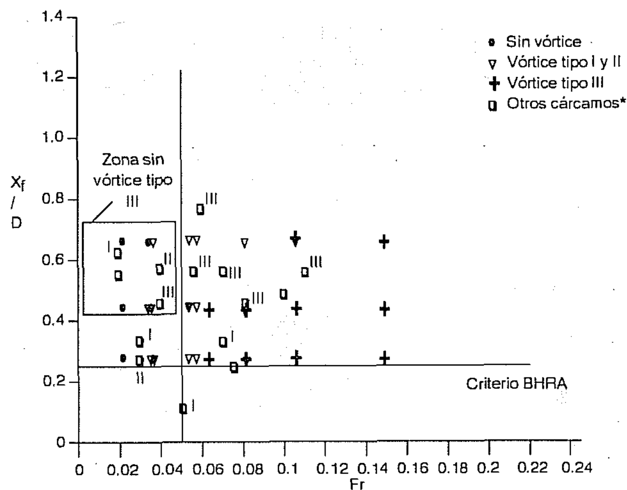
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (I, II, III)

9b. Ocurrencia de vórtices sumergidos, en función del ancho adimensional (W/D) y Fr



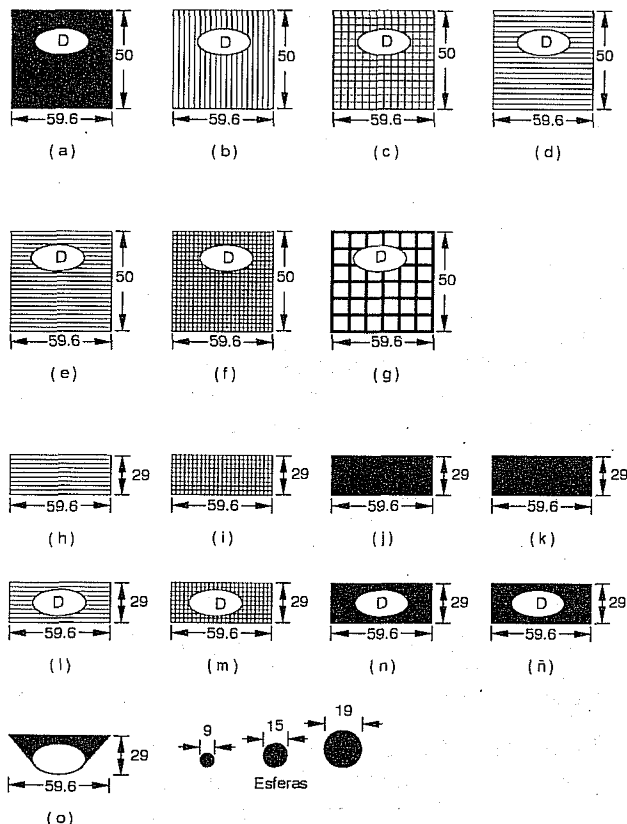
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (A, B)

10a. Ocurrencia de vórtices superficiales, en función de la distancia succión-pared adimensional (X_f/D) y Fr)



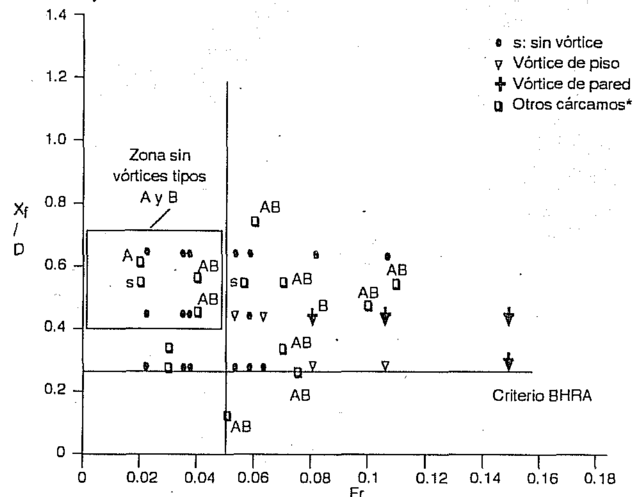
* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (I, II, III)

11. Objetos flotantes. Acotaciones en cm



rejilux, con diferentes geometrías y posiciones como se muestra en la ilustración 12. La diferencia entre las tablas ranuradas (b), (c), (d) y (e) de la ilustración 11 es su abertura. El espesor de las ranuras de las tablas flotantes (b) y (d) es de 2 cm y el de las (c) y (e), de 1 cm. La rejilla tipo A de la ilustración 12 es de 0.8 × 0.8 cm, delgada y la tipo B es de

10b. Ocurrencia de vórtices sumergidos, en función de la distancia pared trasera–campana adimensional (X_f/D) y Fr)

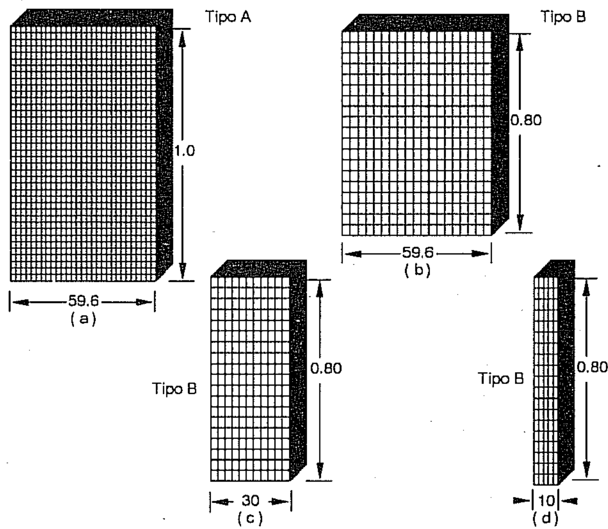


* Para los otros cárcamos se indican los tipos de vórtices (A, B)

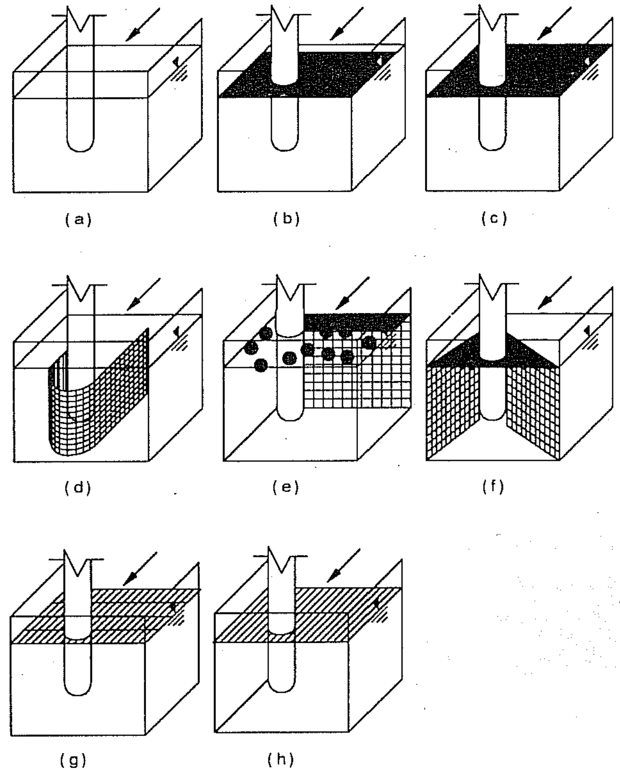
1.7× 1.7 cm con un espesor de 1 cm. Se usaron gastos de 70, 50 y 30 l/s y tirantes H de 0.4 y 0.6 m, debido a que representan las condiciones más desfavorables de vorticidad, según los ensayos descritos, en ausencia de dispositivos antivorticosos. Estas condiciones introducen valores del número de Froude relativamente altos. Entre algunas de las observaciones de esta serie de ensayos se pueden mencionar las siguientes:

- Si en el cárcamo de bombeo se colocaba la tabla flotante de la ilustración 11(a) con una longitud mayor o menor de los 50 cm, se eliminaban los vórtices superficiales pero se intensificaban los vórtices sumergidos de piso, por lo cual se concluye que la longitud adecuada es de 50 cm. Para eliminar los vórtices de piso se colocaron las rejillas verticales de la ilustración 12 (a) y (b) a diferentes distancias aguas abajo del tubo de succión, pero los resultados no fueron satisfactorios debido a que se intensificaban dichos vórtices. Con el objeto flotante de la ilustración 11 (a) colocado en forma aislada y con los 50 cm de longitud, se obtuvieron mejores resultados en la inhibición de vórtices.
- Se hicieron observaciones similares para los casos de las tablas flotantes de la ilustración 11 (b), (c), (d) y (e), pero con la diferencia de que los vórtices sumergidos de piso se presentaban con mayor intensidad. Las tablas ranuradas (b) y (d) permiten la formación de vórtices superficiales; en cambio, las (c) y (e) los eliminan.
- En cuanto a los dispositivos de la ilustración 11 (f) y (g), no eliminaron la vorticidad superficial ni la sumergida, aun cuando las perforaciones

12. Rejillas verticales. Acotaciones en m



13. Arreglos más eficientes en la inhibición de vórtices



circulares (diámetro de 1 cm) y cuadriculares (2 cm) eran pequeñas.

- Se probaron diferentes diámetros de esferas como objetos flotantes, encontrándose que las de 9 cm de diámetro eran las más favorables y se lograban mejores resultados cuando se colocaban en forma conjunta con una rejilla vertical (véase ilustración 12 (b)), y una tabla flotante (véase ilustración 11 (i)). Con este arreglo se observaron únicamente vórtices superficiales del tipo II.
- La colocación de rejillas verticales en forma aislada, (véase ilustración 12), elimina en ocasiones los vórtices sumergidos pero deja inalterada la vorticidad superficial, con excepción de la rejilla (a).

Los arreglos de los dispositivos más eficientes encontrados en este trabajo se muestran en la ilustración 13. En el cuadro 5 se indican los tipos de vórtices observados para las características hidráulicas mostradas sin la colocación de los dispositivos inhibidores de vórtices. El arreglo más eficiente que se encontró para inhibirlos es el compuesto por dos rejillas verticales y una tabla flotante (véanse cuadro 6 e ilustración 14).

Conclusiones y recomendaciones

Las recomendaciones de diseño de la BHRA (Prosser, 1977) no toman en cuenta las condiciones del flujo, es decir, no consideran ningún parámetro hidráulico sino sólo las características geométricas de los cárcamos de bombeo. Se ha demostrado que esta guía de diseño no es totalmente confiable, además de que no predice el comportamiento del flujo cuando algún cárcamo no cumple con sus normas.

A partir del análisis comparativo del comportamiento del flujo en diferentes cárcamos de bombeo y de las experiencias obtenidas en los ensayos de laboratorio, se determinaron las siguientes recomendaciones de las características hidráulicas y geométricas que deben presentar estas estructuras para evitar la formación de vórtices:

Sumergencia permisible	$S/D > 1.5$ y $Fr < 0.05$
Longitud del cárcamo	$L/D > 6$ y $Fr < 0.055$
Distancia succión–fondo	$C/D > 0.52$ y $Fr < 0.05$
Ancho del cárcamo	$2.8 > W/D > 1.95$ y $Fr < 0.05$
Distancia pared trasera-campana	$Xf/D > 0.4$ y $Fr < 0.05$

Como se observa, el valor de Fr es un factor fundamental en la formación de vórtices en cárcamos de bombeo. Entre más pequeño sea su valor, se estará más dentro de la seguridad. En las ilustraciones 7, 8, 9 y 10 se indica el comportamiento hidráulico del cárcamo para valores de las relaciones adimensionales fuera de los rangos recomendados.

De ser imposible poder cumplir con las recomendaciones anteriores, se sugiere utilizar dispositivos inhibidores de vórtices. Al respecto se puede mencionar lo siguiente:

5. Características de los vórtices observados

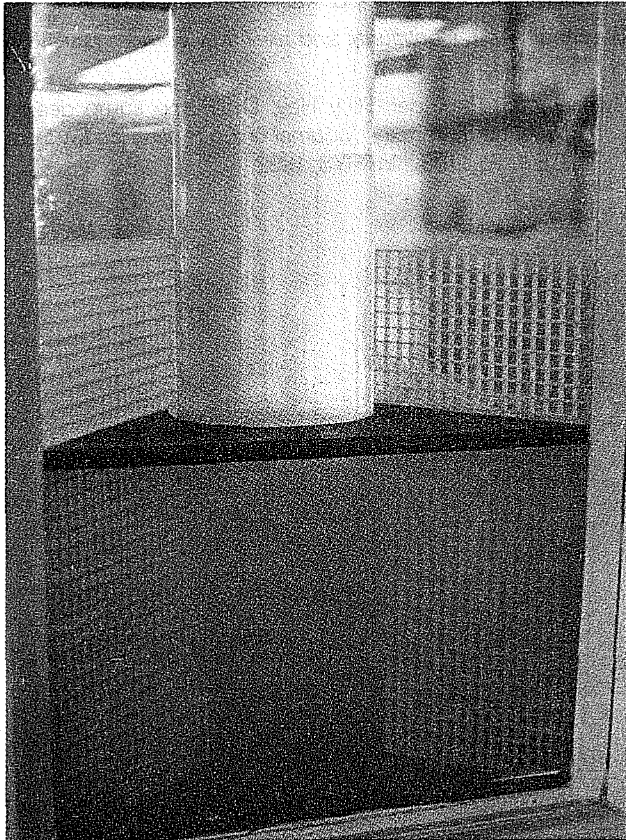
Sin dispositivo antivórtice

Gasto (l/s)	Tirante (m)	Vorticidad superficial Tipo	Intensidad 1	Intensidad 2	Intensidad 3	Intermitencia 1	Intermitencia 2	Intermitencia 3	Intermitencia 4	Vorticidad sumergida Tipo	Intensidad 1	Intensidad 2	Intensidad 3	Intermitencia 1	Intermitencia 2	Intermitencia 3	Intermitencia 4	Observaciones
70.24	0.40	I								A			□				□	
		II		□			□			B								V. tipo III
		III			□		□											V. tipo II
49.94	0.40	I								A	□			□				V. tipo III
		II								B								
		III		□				□										
29.94	0.40	I								A								
		II								B								V. tipo III
		III	□				□											
70.24	0.60	I		□				□		A	□			□				V. tipo III
		II								B								V. tipo I
		III	□				□											
49.94	0.60	I		□		□				A								V. tipo II
		II		□				□		B								V. tipo I
		III																
29.94	0.60	I	□					□		A								V. tipo III
		II								B								
		III																

6. Características de los vórtices observados

Rejillas verticales y objeto flotante

Gasto (l/s)	Tirante (m)	Vorticidad superficial Tipo	Intensidad 1	Intensidad 2	Intensidad 3	Intermitencia 1	Intermitencia 2	Intermitencia 3	Intermitencia 4	Vorticidad sumergida Tipo	Intensidad 1	Intensidad 2	Intensidad 3	Intermitencia 1	Intermitencia 2	Intermitencia 3	Intermitencia 4	Observaciones
70.24	0.40	I								A								
		II								B								Hay circulación debajo del objeto flotante
		III																
49.94	0.40	I								A								
		II								B								Presenta circulación, pero con menor intensidad
		III																
29.94	0.40	I								A								
		II								B								Sin vórtices
		III																
70.24	0.60	I								A								
		II								B								Sin vórtices
		III																
49.94	0.60	I								A								
		II								B								Sin vórtices
		III																
29.94	0.60	I								A								
		II								B								Sin vórtices
		III																



14. Dispositivo compuesto por dos rejillas verticales y un objeto flotante

1) Los objetos flotantes ayudan a eliminar los vórtices superficiales y en ocasiones disminuyen la intensidad de los vórtices sumergidos sin lograr inhibirlos.
2) Las rejillas verticales logran orientar al flujo de manera simétrica para eliminar los vórtices sumergidos y en ocasiones disminuyen la intensidad de los vórtices superficiales.
3) Se recomienda el empleo conjunto de las rejillas verticales y objetos flotantes para obtener buenos resultados en la inhibición de vórtices.

Referencias

Anwar, H. O. Prevention of vortices at intakes, *Water Power*, pp. 393–402, 1968.

Berge, J. P. Enquête sur la formation de vortex et autres anomalies d'ecoulement dans une enceinte avec ou sans surface libre, *La Houille Blanche*, núm 1, pp. 13–40, 1966.

Bonilla, G. R., Vergara, S. M. A., Fragoso, S. L., Fierro, S. J. M., Díaz, B. H. *Estudio en modelo hidráulico del cárcamo de bombeo para la P. T. del Río Escondido Coahuila*, México, Instituto Politécnico Nacional, reporte LIH 15–01 OH, junio 1980.

Bonilla, G. R., Vergara, S. M. A., Fragoso, S. L., Granados, A. R. *Optimización experimental de una cámara de bombeo del cárcamo de la P. T. de Manzanillo CFE*, México, Instituto Politécnico Nacional, reporte LIH 13–00 OH–1, mayo 1979.

Chang, E. Review of literature on the formation and modelling of vortices in rectangular pump sumps, *BHRA* Report TN1414, 1977.

Denny, D. F. y Young, H. J. The prevention of vortices and swirl at intakes, *IAHR Congress Lissbon*, paper C1, 1957.

Dicmas, J. L. Effect of intake structure modifications on the hydraulic performance of a mixed flow pump, *Proc. IAHR–ASME–ASCE Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery*, vols. I and III, CSU Fort Collins, 1978.

González, V. J. A., Garcés, F. G., Bourguett, O. V. J. *Informe final del estudio en modelo hidráulico del cárcamo de bombeo y pileta recolectora de la C. T. Lerdo U1 y U2*, Cuernavaca, Laboratorio de Hidráulica CFE, mayo 1989.

Gulliver, J. S., Rindels, A. J. Weak vortices at vertical intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 113, no. 9, pp. 1101–1115, 1987.

Haindl, K. Contribution to air entraiment by a vortex, *8th Congress de AIRH*, Publication D.16, Montreal, 1959.

Hydraulic Institute Standars for centrifugal, rotary and reciprocating pumps, 13th Edition, Cleveland, Ohio, *EUA*, pp. 108–115, 1975.

Knauss, Jost. Swirling flow problems at intakes, en *Hydraulic Structures Design Manual*, AHR, AIRH, AA Balkema Rotterdam, 1987.

Moreno, B. F., Bonilla, G. R., Escalante, G. F. J., Fierro, S. J. M. *Estudio en modelo físico del cárcamo de bombeo (modificado) C. T. San Luis Potosí, SLP*, México, Instituto Politécnico Nacional, reporte LIH–CB–07–85, 1985.

Nakato, T., Kennedy, J. F., Pruitt, L. L. *Model Investigation of the Lake Chicot Pumping Plant*, Fort Collins, Proc. IAHR–ASME–ASCE Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, CSU, june 1978, pp. 449–460.

Odgaard, A. J., Dlubac, J. J. "Hydraulic Model Study of Pump Sump Design", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110 No. 9, september 1984, pp. 1267–1272.

Ojeda, T. F., Urquiza, M. E., Guzmán, R. R., Ramos, E. A. "Modelo físico del cárcamo de bombeo de la planta termoeléctrica Mazatlán II–Unidad 3", Morelia, *Memorias 10° Congreso Nacional de Hidráulica*, tomo I, octubre 1988, pp. 700–711.

Organización Internacional de Estandarización. International *Standard ISO 5167*, 1a. ed., 1980.

Paterson, I. S. y Noble, R. M. The right approach proceedings of the IAHR, *Symposium on Operating Problems of Pump Stations and Power Plants*, Amsterdam, 1982.

Prosser, M. J. *The hydraulic design of pump sumps and intakes*, British Hydromechanics Research Association Construction Industry Research and Information Association, 1st ed., Cranfield, Bedford, England, 1977.

Ramos, C. M., Del Rivero, L., De Garreta, J. *Redesign of Old Pump Sumps. Case Studies*, Manchester England, Int. Conf. on the Hydr. of Pumping Stations, september 1985.

Soriano, P. T., Aparicio, M. F. J. *Consideraciones sobre el diseño y la vorticidad en cárcamos de bombeo rectangulares*, XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo Uruguay, Vol. 1, pp. 429–438, 1980.

Stepanoff, A. J. *Centrifugal and axial flow pumps*, pp. 363–367, 1948.

Sweeney, C. E., Elder, R. y Hay, D. "Pump sump design experience: summary", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 1, vol. 108, No. HY3, 1982.